

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики  
**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Исследование механических и трибологических свойств многослойных защитных покрытий на основе системы Ti-Al-N, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления
УДК 621.793.7:621.891:531.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ51	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Панин Алексей Викторович	д.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения ЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
<b>Р1</b>	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОСЗ+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
<b>Р2</b>	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОСЗ+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
<b>Р3</b>	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
<b>Р4</b>	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
<b>Р5</b>	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		
<b>Р6</b>	<u>Научно-исследовательская деятельность</u> Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-1, ПК-2)

<b>P7</b>	<u>Научно-инновационная деятельность</u> Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
<b>P8</b>	<u>Организационно-управленческая</u> Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОСЗ+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)
<b>P9</b>	<u>Педагогически-просветительская</u> Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»  
Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

Лидер А.М  
(Ф.И.О.)

## ЗАДАНИЕ

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0Б51	Кузьминову Евгению Дмитриевичу

Тема работы:

Исследование механических и трибологических свойств многослойных защитных покрытий на основе системы Ti-Al-N, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

## Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Многослойные защитные покрытия Ti-Al-N/Ti-Al, нанесенные методом реактивного магнетронного распыления

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Обзор литературных источников;</li> <li>- Нанесение покрытий Ti-Al-N/Ti-Al;</li> <li>- Исследование механических и трибологических свойств полученных покрытий;</li> <li>- Анализ полученных результатов;</li> <li>- Социальная ответственность;</li> <li>- Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>- Заключение.</li> </ul>
--	---

#### **Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич, к.э.н., доцент ОСГН ШБИП,
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна, Старший преподаватель ООД ШБИП

#### **Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**


#### **Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику**

<b>Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):</b>				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Панин Алексей Викторович	д.ф.-м.н.		

#### **Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ51	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б51	Кузьминову Евгению Дмитриевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	Экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Принять по действующим ценам
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	-
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	НДС и социальный налог

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Выполнить
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Выполнить
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	-

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

## Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Кузьминов Евгений Дмитриевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
0Б51		Кузьминову Евгению Дмитриевичу	
<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Исследование механических и трибологических свойств многослойных защитных покрытий на основе системы Ti-Al-N, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования являются защитные многослойные покрытия Ti-Al-N/Ti-Al, нанесённые методом магнетронного распыления на установке МИР-1М. Данные покрытия предназначены для увеличения износостойкости деталей и механизмов, работающих в условиях трения
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>— специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>— организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)</li> <li>- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;</li> <li>- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.</li> </ul> <p>Документы по воздействию ПЭВМ:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;</li> <li>- ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</li> <li>- ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.</li> <li>- ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в</li> </ul>

	<p>аналитических лабораториях (общие положения).</p> <p>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Анализ опасных факторов производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– термическая опасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность.</li> </ul> <p>Анализ вредных факторов производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Воздействие электрического напряжения на организм человека;</li> <li>– Воздействие высокой температуры на организм человека;</li> <li>– Воздействие химических веществ на дыхательные пути и организм человека в целом;</li> <li>– Утечка газа из баллона;</li> <li>– Микроклимат.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Выброс в атмосферу химических веществ;</li> <li>– Выброс паров масла из фильтра пластинчато-роторного насоса.</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Возможные чрезвычайные ситуации:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Утечка газа из баллона;</li> <li>– Возникновение возгорания;</li> <li>– Поражение оператора установки электрическим током;</li> </ul> <p>Наиболее типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Возникновение возгорания.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ51	Кузьминов Евгений Дмитриевич		



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования бакалавриат

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2018	Аналитический обзор литературы	15
01.09.2018	Нанесение многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al методом реактивного магнетронного распыления	15
30.12.2018	Исследование механических и трибологических свойств покрытий Ti-Al-N/Ti-Al	20
30.04.2019	Анализ результатов	15
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2019	Социальная ответственность	15
25.05.2019	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Панин Алексей Викторович	д.ф-м.н		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения ЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 69 с., 16 рис., 11 табл., 61 источников.

Ключевые слова: Ti-Al-N/Ti-Al, многослойные покрытия, износостойкость, трение, магнетронное распыление.

Объектом исследования являются защитные многослойные покрытия Ti-Al-N/Ti-Al, нанесенные методом реактивного магнетронного распыления.

Цель работы – исследование механических и трибологических свойств многослойных защитных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al с различным количеством и толщиной керамических и металлических слоев, а также определение принципов конструирования данных покрытий с оптимальными механическими и трибологическими характеристиками.

В ходе работы проводилось нанесение покрытий Ti-Al-N/Ti-Al с различным количеством и толщиной слоев на подложки из нержавеющей стали, изучение поверхности и поперечного сечения, а также исследование физических, механических и трибологических свойств покрытий.

В результате исследования установлено, что покрытия Ti-Al-N/Ti-Al с толстыми керамическими и тонкими металлическими слоями являются более износостойкими в сравнении с однослойным покрытием Ti-Al-N, в то же время показано, что количество слоев не оказывает существенного влияния на скорость их изнашивания.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: толщина покрытий составила 3 мкм, нанесение многослойных покрытий с оптимальной архитектурой позволяет снизить скорость изнашивания в 3 раза по сравнению с однослойным покрытием.

Область применения: результаты исследований могут быть использованы для разработки защитных многослойных покрытий с чередующимися керамическими и металлическими слоями.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании покрытий, позволяющих повысить время работы деталей и механизмов, работающих в условиях трения.

## Оглавление

РЕФЕРАТ .....	10
Введение.....	14
Глава 1. Износостойкие покрытия: свойства и методы нанесения.....	16
1.1 Основные типы твердых износостойких покрытий.....	16
1.2 Покрытия на основе нитридов переходных металлов .....	17
1.3 Многослойные износостойкие покрытия.....	19
1.4 Методы нанесения износостойких покрытий.....	21
1.4.1 Термическое испарение .....	21
1.4.2 Вакуумно-дуговое испарение .....	23
1.4.3 Магнетронное распыление .....	25
Глава 2. Материалы и методика экспериментов.....	28
Глава 3. Результаты экспериментов и их обсуждение .....	32
3.1 Изучение морфологии поверхности покрытий Ti-Al-N/Ti-Al методом атомно-силовой микроскопии .....	32
3.2 Исследование микроструктуры и фазового состава покрытий .....	33
Ti-Al-N/Ti-Al .....	33
3.3 Определение механических характеристик покрытий Ti-Al-N/Ti-Al.....	34
3.4 Трибологические испытания покрытий Ti-Al-N/Ti-Al.....	36
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	41
4.1 Организация и планирование работ.....	41
4.2 Продолжительность этапов работ.....	42
4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	44
4.3.1 Расчёт затрат на материалы.....	44
4.3.2 Расчет заработной платы .....	45
4.3.3 Расчет затрат на социальный налог.....	46
4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	46
4.3.5 Расчет амортизационных расходов .....	47
4.3.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов .....	47
4.3.7 Расчет прочих расходов.....	47
4.3.8 Расчет общей стоимости разработки.....	48

4.3.9 Расчет прибыли.....	49
4.3.10 Расчет НДС .....	49
4.3.11 Цена разработки НИР .....	49
4.4 Оценка экономической эффективности исследования.....	49
Глава 5. Социальная ответственность.....	50
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	50
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства .....	50
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	51
5.2 Профессиональная социальная безопасность.....	52
5.2.1 Анализ вредных производственных факторов.....	53
5.2.2 Анализ опасных факторов.....	56
5.3 Экологическая безопасность .....	58
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	58
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	58
5.4.2 Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	59
5.5 Выводы по разделу .....	61
Заключение .....	62
Список литературы .....	64

## Введение

Несмотря на многовековую историю проблемы трения и износа, задача повышения эффективности эксплуатации и долговечности деталей, работающих в узлах трения различных конструкций и механизмов, по-прежнему, остается очень актуальной. На сегодняшний день основным способом повышения износостойкости конструкционных материалов является модификация их поверхности, в частности путем нанесения на поверхность изделий износостойких защитных покрытий. При этом ни один из существующих типов материалов, традиционно используемых для нанесения защитных покрытий, не обладает полным комплексом необходимых физико-механических свойств. В связи с этим наиболее перспективным направлением решения проблемы повышения износостойкости изделий является нанесение на них многослойных композиций, в составе которых чередуются слои различных материалов [1-5]. Преимущество данного подхода заключается в возможности комбинирования различных слоев, их количества и относительной толщины, что обеспечивает градиентное изменение их свойств и позволяет добиться необходимого сочетания эксплуатационных характеристик.

В данной работе исследуются многослойные покрытия, состоящие из чередующихся керамических слоев Ti-Al-N и металлических слоев Ti-Al. Покрытия на основе нитридов переходных металлов на сегодняшний день наиболее востребованы из всего многообразия защитных покрытий. При этом покрытия системы Ti-Al-N обладают улучшенными характеристиками по сравнению с традиционно используемыми двухкомпонентными нитридными покрытиями. Добавление Al в покрытия TiN позволило резко увеличить их стойкость к окислению (с 500°C до 800°C), а также обеспечить сохранение высоких значений твердости и износостойкости при повышенных температурах [6]. Введение промежуточных вязких металлических слоев Ti-Al позволяет существенно повысить вязкость разрушения покрытий на основе Ti-Al-N. Однако одновременно с этим неизбежно происходит снижение твердости и

модуля упругости покрытий, что ухудшает их несущую способность, которая, в свою очередь, оказывает существенное влияние на износостойкость покрытий. Степень влияния указанных факторов на механические и трибологические свойства многослойных покрытий зависит от расположения, количества, а также общей и относительной толщины отдельных слоев. Поэтому надежность и долговечность многослойных покрытий в трибологических применениях в значительной степени определяются их архитектурой.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является исследование механических и трибологических свойств многослойных защитных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al с различным количеством и толщиной керамических и металлических слоев, а также определение принципов конструирования данных покрытий с оптимальными механическими и трибологическими характеристиками.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Отработать режимы нанесения многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al с различными конфигурациями слоев методом реактивного магнетронного распыления;
- 2) Исследовать морфологию поверхности, структуру, а также определить фазовый и элементный состав покрытий;
- 3) Изучить механические свойства покрытий методом наноиндентирования;
- 4) Исследовать трибологические свойства покрытий в условиях сухого трения скольжения;
- 5) Проанализировать влияние количества и толщины слоев в многослойных покрытиях Ti-Al-N/Ti-Al на их механические и трибологические характеристики, и выработать рекомендации для получения многослойных покрытий с оптимальной архитектурой слоев.

## Глава 1. Износостойкие покрытия: свойства и методы нанесения

### 1.1 Основные типы твердых износостойких покрытий

Современные требования промышленной отрасли к повышению эффективности и длительности эксплуатации механизмов и конструкций, привели к необходимости модификации их поверхности. Одним из основных методов подобной модификации является нанесение на изделия износостойких защитных покрытий. Для синтеза таких покрытий используется множество различных материалов, которые можно разделить на три группы по типам химической связи (рисунок 1).

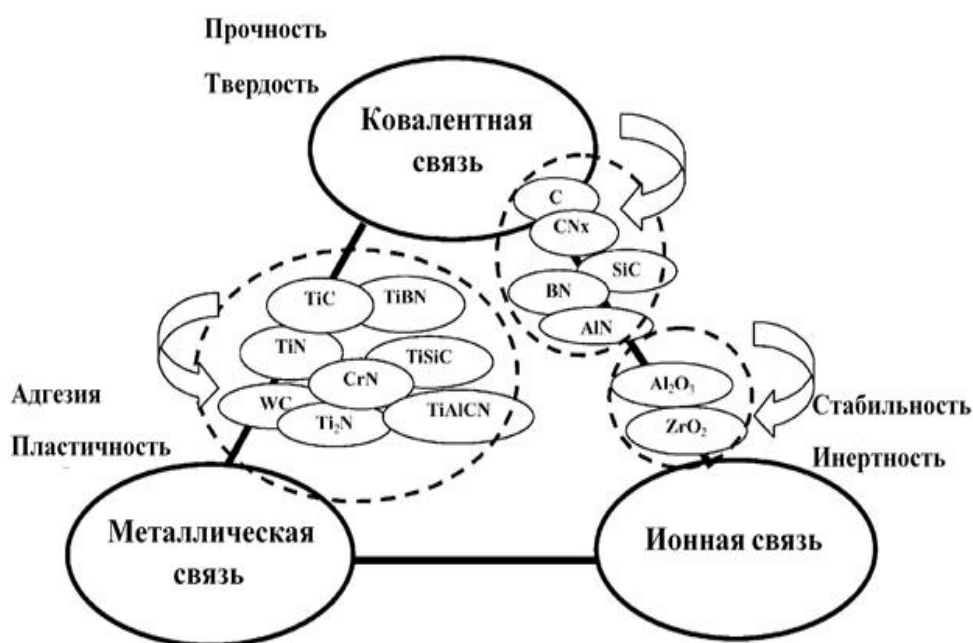


Рисунок 1 – Зависимость свойств защитных покрытий от типа химической связи используемых в них материалов [7]

Ковалентная связь, характерная для нитридов, карбидов и боридов алюминия и кремния, обуславливает высокую твердость покрытий. Однако недостатком таких покрытий является высокотемпературная нестабильность



структуры и фазового состава, а также слабая адгезионная прочность системы «покрытие-подложка».

Оксиды алюминия, циркония, титана и бериллия [8], химическая связь в которых является ионной, имеют высокую термическую стабильность. Однако различные внешние воздействия способны вызывать хрупкое разрушение таких покрытий. [9]. Наиболее широко используемым оксидом для изготовления защитных покрытий является  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Достоинствами этого соединения являются не только термическая стабильность, но и химическая инертность, а также высокая твердость при повышенных температурах [10]. В свою очередь, оксид хрома тоже не реагирует с большим количеством щелочей и кислот, а также не имеет склонности к фазовым превращениям и обладает более высокой твердостью, чем оксид алюминия. Однако широкое применение данного соединения ограничивает его низкая трещиностойкость.

Наконец, связь, образованная в бориды, нитриды и карбиды переходных металлов (TiB, TiN, WC) является металлической. Покрытия с такой связью характеризуются высокой адгезией к подложке, но низкой окислительной стойкостью при высоких температурах [11]. Среди карбидов переходных металлов наиболее широко используется TiC, твердость которого выше, чем у TiN, что является следствием особенностей химической связи [12]. Однако при нанесении покрытий TiC на изделия из цементированной стали, существенным недостатком становится диффузия углерода из подложки. Это приводит к его дефициту и образованию хрупкой  $\eta$ -фазы на границе раздела «покрытие-подложка», приводящей к быстрому разрушению защитного покрытия. Также, технология нанесения карбидных покрытий является более сложной по сравнению с осаждением нитридов, а использование прекурсоров в состав которых входит водород, приводит к загрязнению им покрытий.

## **1.2 Покрытия на основе нитридов переходных металлов**

Нитриды переходных металлов первыми получили широкое распространение в роли защитных покрытий. Так, разработка CrN как защитного материала, позволила создать эффективные покрытия, обладающие повышенной коррозионной стойкостью и низким коэффициентом трения (0,4 [13]). Позднее были созданы нитридные покрытия на основе различных металлов от W до Sc. На сегодняшний день наиболее широко в промышленных применениях используются покрытия TiN, обладающие высокой твердостью и трещиностойкостью. Нитрид титана кристаллизуется в структуре NaCl B1 и существует в виде твердого раствора, содержащего азот в диапазоне от 37,5 до 50 ат.% [6]. Твердость TiN и модуль упругости составляют 30 ГПа и 290 ГПа, соответственно [14], что делает этот материал хорошим выбором для защитных износостойких покрытий. Однако, несмотря на то, что керамические покрытия TiN были самыми распространенными в течение длительного времени, они имеют существенные недостатки. Так, низкая окислительная стойкость при температуре порядка 500 °C и высокий коэффициент трения (0,6-0,8 [15]), приводят к снижению их твердости и износостойкости.

Для решения данной проблемы было предложено использовать многоэлементные покрытия [16]. Так, превосходными механическими, трибологическими и коррозионными свойствами обладают покрытия Ti-Al-N [6]. Увеличенные твердость и износостойкость этих покрытий, в сравнении с TiN, обусловлены тем, что вследствие высоконерасовесных условий осаждения в них формируется метастабильный пересыщенный твердый раствор  $Ti_{1-x}Al_xN$ . Поскольку Al обладает меньшим ионным радиусом, чем титан, то, замещая его в ГЦК решетке TiN, алюминий может способствовать уменьшению параметра решетки покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  с 0,424 нм вплоть до 0,417 нм в зависимости от концентрации [17]. Это приводит к упругой дисторсии кристаллической решетки и, как следствие, к твердорастворному упрочнению материала покрытия [18]. При достаточно высоком относительном содержании алюминия, ввиду ограниченной взаимной растворимости нитридов титана и алюминия, возможен также и механизм дисперсного упрочнения покрытий.

Исходя из этого, твердость метастабильных покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$  возрастает с увеличением содержания в них Al и может достигать  $\sim 40$  ГПа при  $x \sim 0,5$  [19].

### 1.3 Многослойные износостойкие покрытия

Непрерывное увеличение скоростей работы и, как следствие, рабочих температур режущих инструментов, штампов, пресс-форм и др. выдвигает все более высокие требования к механическим и трибологическим свойствам защитных покрытий, а также обуславливает необходимость их повышенной стойкости к окислению. Кроме того, известно, что твердые покрытия обычно характеризуются низкой трещиностойкостью, которая не менее важна для обеспечения их высоких трибологических характеристик [20, 21]. В связи с этим существует острая необходимость разработки новых типов покрытий с улучшенными характеристиками.

Было показано, что износостойкость твердых защитных покрытий может быть эффективно улучшена путем введения между твердыми и хрупкими керамическими слоями вязких металлических слоев [22]. Такие многослойные покрытия одновременно обладают преимуществами различных типов материалов, что приводит к уникальному сочетанию их твердости и вязкости разрушения. Поскольку распространение трещин в металлических слоях сопровождается развитием зоны пластического течения вокруг вершины трещины, диссипация энергии при распространении трещин в многослойных покрытиях существенно возрастает. Дополнительное рассеяние энергии деформации обеспечивается отклонением трещины на границах раздела между слоями, что приводит к упрочнению покрытий. Чередование слоев в многослойной композиции также предотвращает рост столбчатых зерен, что способствует легкому распространению трещин по границам зерен. Кроме того, вязкие промежуточные слои обеспечивают улучшение адгезии покрытия, релаксацию напряжений и снижение пористости [23].

В последнее время, для улучшения механических и трибологических свойств многослойных покрытий на основе Ti-Al-N были использованы различные промежуточные слои, например, Ti [24, 25], Al [26], Cu [27], Ta [28] и Mo [29]. Недавно была предложена многослойная композиция Ti-Al-N/Ti-Al [30-32]. Титан обладает высоким сродством к слоям Ti-Al-N, поэтому его наличие в металлических слоях обеспечивает сильную адгезию между слоями керамики и металла [26]. Легирование промежуточных металлических слоев значительными количествами алюминия улучшает их стойкость к окислению и, следовательно, износостойкость многослойных покрытий. Еще одна причина использования промежуточных слоев Ti-Al состоит в том, что, хотя поток азота прекращается до их осаждения, остаточный азот сохраняется в камере осаждения и реагирует с металлами. Последнее приводит к градиентной структуре интерфейса, которая также способствует улучшению механических и трибологических свойств многослойных композиций [33]. Несмотря на указанные преимущества многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al по сравнению с монокристаллическими покрытиями Ti-Al-N, в проведенных ранее исследованиях было установлено, что, хотя при определенном соотношении толщин слоев твердость многослойных покрытий выше, чем у монокристаллического покрытия, объемный износ многослойных композиций всегда больше [30]. Сравнительный анализ покрытий Ti-Al-N/Ti-Al и TiN/Ti показал, что твердость, модуль упругости и остаточные напряжения были выше для Ti-Al-N/Ti-Al, в то время как критическая нагрузка для отслоения при скретч-тестировании была выше для TiN / Ti [32].

Возможным объяснением относительно низкой износостойкости многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al может быть их неоптимизированная архитектура. Такие параметры, как количество слоев, толщина слоев и соотношение толщин разных слоев, оказывают большое влияние на характеристики многослойных покрытий [22, 34, 35].

## 1.4 Методы нанесения износостойких покрытий

Большое влияние на характеристики любых покрытий оказывает метод их нанесения. В настоящее время выделяют две основные технологии нанесения защитных покрытий: физическое осаждение из паровой фазы (physical vapor deposition или PVD) и химическое осаждение из паровой фазы (chemical vapor deposition или CVD). Обычно, температура нанесения покрытий CVD-методами выше, чем PVD-методами, что приводит к отсутствию чётких границ раздела между покрытием и подложкой, а также между слоями в многослойных композициях [2]. Градиентная структура интерфейса является следствием взаимной диффузии материалов при воздействии высокой температуры и может существенно улучшать адгезию слоев. Недостатком методов CVD в сравнении с PVD является отсутствие гибкости в управлении количеством и толщиной слоев наносимого покрытия в связи со сложностью управления газовыми потоками. В то же время PVD-методы дают возможность наносить множество слоев с толщиной, не превышающей несколько нанометров [36, 37]. Среди методов физического испарения из паровой фазы наиболее популярными являются:

- Термическое испарение
- Вакуумно-дуговое испарение
- Магнетронное распыление

### 1.4.1 Термическое испарение

Термическое испарение представляет собой одну из самых старых технологий нанесения тонких пленок. Процесс нанесения основан на испарении материала, переносе его в виде потока пара и сублимации на подложку в вакууме (Рисунок 2). Вещества, наиболее часто используемые для образования тонких пленок путем испарения, представляют собой элементы или простые соединения с давлением паров, которое превышает  $10^{-4}$  Па при температурах

ниже  $2000^{\circ}\text{C}$  и обычно осаждаются со скоростью от 50 до 1000 нм/мин. Для испарения материалов используются два наиболее распространенных метода: электронно-лучевое испарение и испарение с резистивным нагревом.

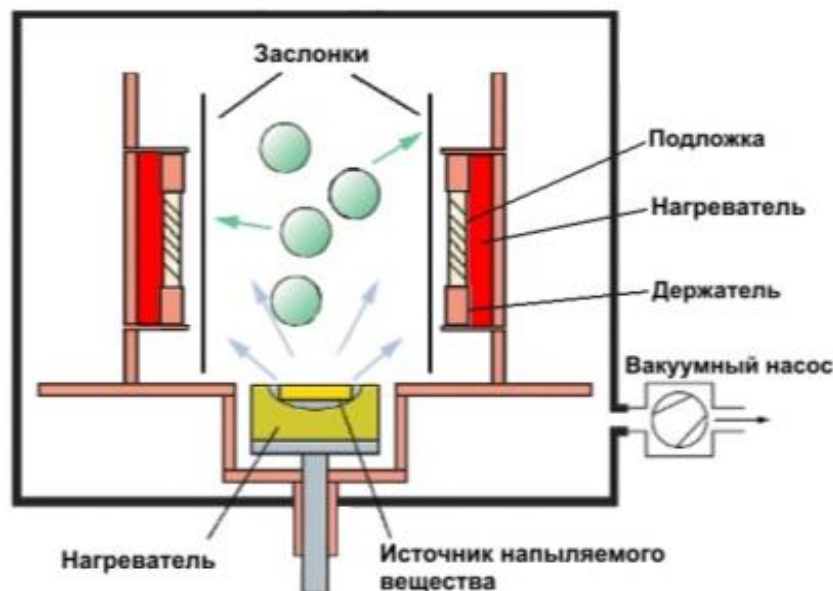


Рисунок 2 – Схема установки термического испарения

При испарении электронным лучом, электроны, генерируемые электронной пушкой, ускоряются электрическим полем, бомбардируя поверхность осаждаемого материала с последующим локальным плавлением и испарением. Чтобы предотвратить попадание в исходный материал примесей из нити накала, генерирующей электронный луч, его помещают в углубление в медном тигле с водяным охлаждением. Магнитное поле изгибает путь электронного луча, тем самым, экранируя примеси. Кроме того, металл образует собственный тигель, зона контакта которого с медным тиглем оказывается слишком холодной для физических или химических реакций, что позволяет минимизировать загрязнения исходного материала. В этой системе возможны очень высокие скорости осаждения, в зависимости от расстояния между источником и подложкой. Системы, использующие электронно-лучевой нагрев, могут генерировать достаточно высокие температуры, так что возможно испарение широкого спектра материалов, таких как Al и его сплавы, Si, Ti, Mo,

W, Pd, Pt и т. д., а также некоторые диэлектрики, такие как  $\text{SiO}_2$  [38]. Одним из недостатков использования электронного луча является генерация рентгеновского излучения. Это ионизирующее излучение может проникать через поверхностные слои, вызывая повреждения, для устранения которых требуется последующий отжиг.

При использовании резистивного испарения, в качестве нагревательного элемента применяют тугоплавкий металл, имеющий разнообразную форму, например лент или спиралей, обернутых вокруг испаряемого материала. Испарение с резистивным нагревом является простым и недорогим и не производит ионизирующего излучения. К его недостаткам относятся возможное загрязнение от нагревательного элемента и ограниченная толщина пленки из-за небольшой степени ионизации по сравнению с испарением электронным лучом. Кроме того, резистивные нагреватели не могут достигать таких высоких температур, как при воздействии электронного луча, так что может быть испарен меньший диапазон материалов. Например, тугоплавкие металлы, такие как платина, молибден, тантал и вольфрам, нагреть до температур, необходимых для достижения достаточного давления паров, очень сложно.

#### **1.4.2 Вакуумно-дуговое испарение**

Процесс испарения осуществляется путем создания дуги тлеющего разряда между анодом и катодом, роль которого выполняет испаряемый материал. В системе электродов, находящихся в среде инертного газа, создается разность потенциалов достаточная для зажигания электрической дуги (рисунок 3). В месте контакта дуги с катодом, образуется катодное пятно, имеющее высокую плотность тока и температуру порядка  $15000\text{ }^\circ\text{C}$ , позволяющее испарять материал с высокой скоростью потока пара [39]. При создании дуги, катодное пятно возникает в месте, соответствующем наибольшей разности потенциалов, но в процессе испарения эта разность в точке контакта

уменьшается, в то время как напряжение на соседних участках увеличивается, что приводит к произвольному перемещению дуги по поверхности катода. Так как дуга является электрической, то при воздействии на неё магнитного поля появляется возможность быстрого перемещения катодного пятна по испаряемой поверхности, что приводит к более равномерной выработке катода [40]. Наличие электрической дуги с высокой плотности тока позволяет получать потоки пара с большой степенью ионизации, что приводит к высокой адгезии наносимых покрытий.

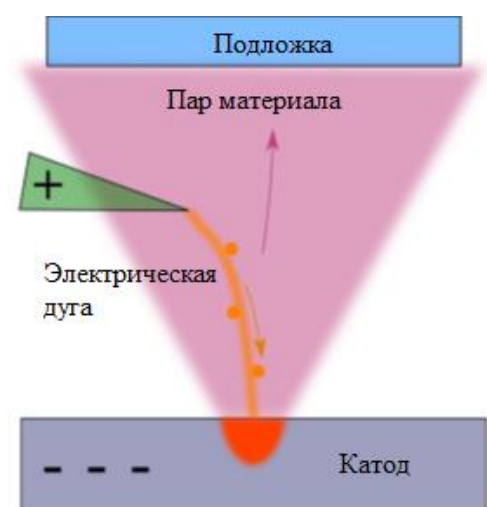


Рисунок 3 – Принцип работы установки для вакуумно-дугового испарения

Основным недостатком процесса дугового испарения является образование макрочастиц. Макрочастицы (макрокапли) являются результатом образования капель при дуговом испарении материалов с низкой температурой плавления (например, алюминия в случае покрытия Ti-Al-N). Также считается, что очень быстрое испарение в процессе катодной дуги приводит к образованию избыточного количества атомов, которые не полностью ионизируются до того, как они достигнут поверхности подложки. Эти нейтральные атомы могут объединяться, образуя макрочастицы во время полета [41]. Осаждающиеся капли образуют дефекты в виде дисперсных включений, которые сильно снижают прочность и износостойкость получаемых покрытий.



### 1.4.3 Магнетронное распыление

Для того чтобы значительно увеличить число электронов, которые ионизируют газ, и тем самым повысить скорость осаждения покрытия применяется метод магнетронного распыления (magnetron sputtering). Распыление осуществляется с помощью магнетрона (рисунок 4.), который состоит из катода, анода и магнитной системы. Катод представляет собой мишень из распыляемого материала, а анодом может служить заземленные подложкодержатель или вакуумная камера. Магнитная система зачастую состоит из постоянных магнитов, но также возможно использование электромагнитов для управления магнитным полем.

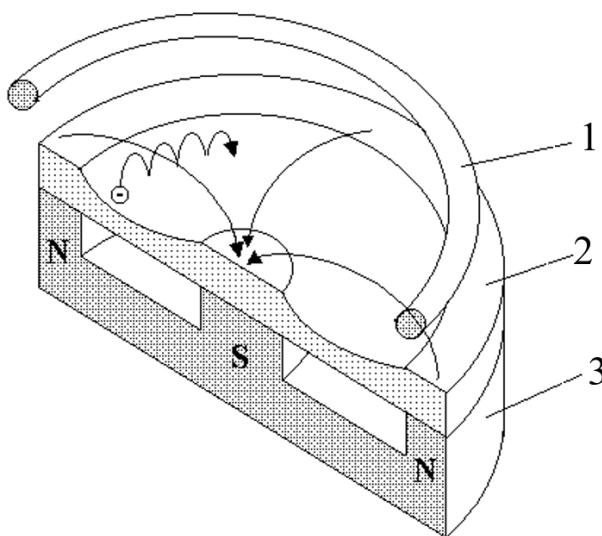


Рисунок 4 – Схема магнетрона: 1-анод, 2-катод, 3-магнитная система.

Между катодом и анодом создается электрическое поле, которое действует на ионы рабочего газа и электроны, эмитированные из катода (рисунок 5). Электроны, двигающиеся в направлении положительно заряженной подложки, ионизируют газ в электродном промежутке. Ионы

рабочего газа ускоряются электрическим полем в направлении катода-мишени и выбивают атомы материала, производя распыление.

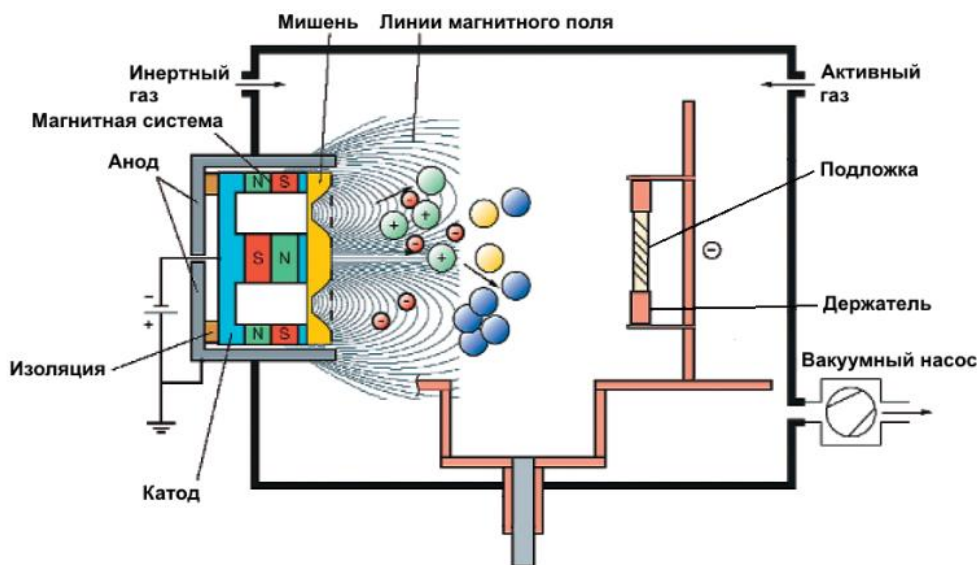


Рисунок 5 – Схема магнетронной распылительной системы

Магнитная система, состоящая из двух коаксиальных цилиндрических постоянных магнитов, служит для создания так называемой магнитной ловушки. Свое название это явление объясняет тем, что электроны, вылетевшие из катода в направлении анода, меняют свое направление под действием силы Лоренца и начинают двигаться по циклоидной траектории в слое между плазмой и мишенью, возвращаясь обратно на катод. Таким образом, создается азимутальный дрейф электронов, который увеличивает степень ионизации рабочего газа [42].

Выработка мишени происходит не равномерно по всей её площади, а лишь там, где сила Лоренца максимальна, то есть вектор магнитной индукции и напряженность электрического поля пересекаются под прямым углом. Процесс распыления проходит в атмосфере рабочего газа, с предварительно созданным вакуумом. Рабочий газ ионизируется посредством электронов с катода. Электрическое поле ускоряет ионы газа в направлении мишени с энергией, достаточной для выбивания атомов материала с поверхности катода. Затем, атомы материала, пролетая через область плазмы, попадают на подложку и

осаждаются в виде покрытий. В случае, когда необходимо напылять плёнки оксидов или нитридов, используют реактивный газ. Напускаемый в рабочую камеру, он вступает в реакцию с материалом мишени, образуя покрытия необходимого состава.

В некоторых системах распыления магнетрон работает при напряжениях на порядок величины ниже напряжения источника электронного луча и, следовательно, генерирует меньшее проникающее излучение. При напылении источник не нагревается до высоких температур, и давление пара источника не учитывается, как при термическом испарении [40]. Также магнетронное распыление не приводит к появлению капельной фазы, в отличие от вакуумно-дугового испарения. Однако существенными недостатками данной технологии являются высокая стоимость и сложность оборудования, а также низкая скорость нанесения покрытий.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что реактивное магнетронное распыление является наиболее подходящим методом нанесения многослойных многокомпонентных покрытий. Возможность гибкого варьирования состава покрытий, высокая степень контроля количества и толщины слоев, а также отсутствие капельной фазы позволяют синтезировать необходимые в данной работе многослойные структуры с точно заданными характеристиками.

## Глава 2. Материалы и методика экспериментов

Подложки из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1,5 мм были изготовлены в форме прямоугольных пластин с размерами 15\*10 мм, 40\*40 мм и лопаток с длинной рабочей части 30 мм и шириной 5 мм. Подготовка подложек для нанесения покрытий проводилась путем механической шлифовки и полировки поверхности до зеркального блеска.

Исследуемые в работе покрытия Ti-Al-N/Ti-Al были нанесены методом реактивного магнетронного распыления на установке МИР 1-М (рисунок 6).

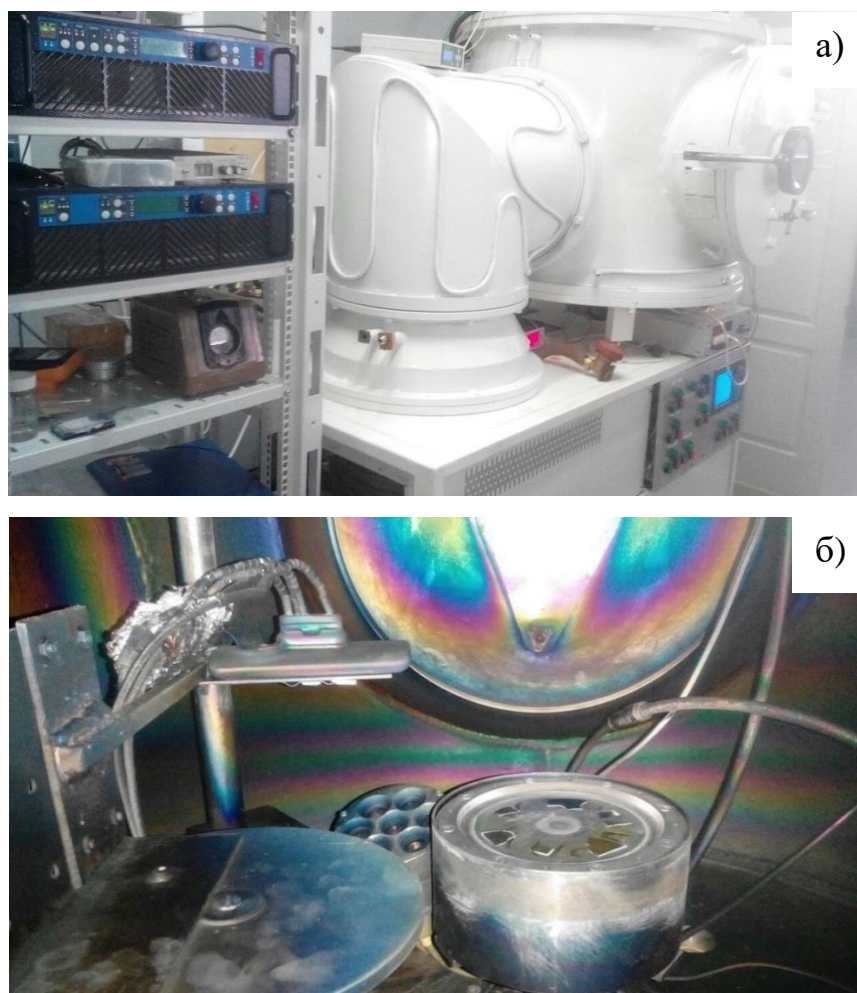


Рисунок 6 – Внешний (а) и внутренний (б) вид установки МИР1-М

Покрyтия Ti-Al-N/Ti-Al наносились на подложки, нагреваемые до температуры 245 °C керамическим нагревателем. С целью очистки подложек проводилась их бомбардировка ионами Ar с напряжением на ионном источнике 3,5 кВ. Длительность ионной очистки составляла 20 минут при давлении 0,12 Па.

Мозаичная мишень, используемая в данной работе, представляла собой диск Ti диаметром 120 мм и толщиной 10 мм с шестью вставками Al диаметром 20 мм. Количество вставок рассчитывалось таким образом, чтобы итоговый состав керамических слоев соответствовал  $Ti_{0,55}Al_{0,45}N$ . В качестве реактивного газа использовался  $N_2$ , а рабочего – Ar. Общее давление инертного и реактивного газов во время напыления поддерживалось на уровне 0,3 Па, с парциальным давлением  $N_2$  порядка  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Для улучшения адгезии покрытий на подложку был нанесен подслои Ti-Al толщиной 50 нм.

Нанесение многослойных покрытий осуществлялось путем чередования металлических (Ti-Al) и керамических (Ti-Al-N) слоев. При нанесении Ti-Al-N производилась подача реактивного газа. При напылении Ti-Al подача  $N_2$  прекращалась. Напыление многослойных покрытий осуществлялось с постоянной мощностью 1,4 кВт и напряжением 0,41 кВ на магнетроне. Путем варьирования продолжительности работы магнетронного разряда были получены образцы, состоящие из 7 и 21 чередующихся слоев Ti-Al-N и Ti-Al (таблица 1). В случае 7-слойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al длительность нанесения каждого керамического и металлического слоя составляла 10 и 3 минуты, 14 и 2 минуты, 5 и 5 минут соответственно. В случае 21-слойного покрытия Ti-Al-N/Ti-Al длительность нанесения каждого керамического и металлического слоя составляла 4 и 1 минут соответственно. Необходимая длительность осаждения нитридных и металлических слоев была определена путем измерения скорости их осаждения при выбранных режимах нанесения. Общая толщина каждого покрытия составляла 3 мкм.

Таблица 1 – Количество и толщина слоев, среднеквадратичная шероховатость ( $R_q$ ) покрытий на основе Ti-Al-N

Номер образца	Количество слоев Ti-Al-N/Ti-Al	Толщина слоев Ti-Al-N/Ti-Al, мкм	$R_q$ , нм
1	1/0	3,0/0	11,0
2	4/3	0,5/0,3	7,9
3	11/10	0,21/0,07	6,5
4	4/3	0,6/0,2	8,4
5	4/3	0,3/0,6	8,2

Морфологию поверхности защитных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver HV. АСМ-изображения поверхности образцов были получены при комнатной температуре в условиях атмосферы. Сканирование проводили в контактном режиме при постоянном значении тока фотодиода. Изображения поперечного сечения покрытий и поверхностей дорожек трения были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) EVO 50.

Рентгенофазовые и рентгеноструктурные исследования покрытий проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с помощью  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения. Фазовый состав определялся посредством использования баз данных PCPDFIN, а также программы POWDER CELL 2.5.

Механические характеристики покрытий Ti-Al-N/Ti-Al были исследованы методом наноиндентирования с помощью нанотвердомера NanoTest. Измерения осуществляли с использованием трехгранной пирамидки Берковича при максимальных нагрузках от 1 до 100 мН. Последующий анализ данных проводили методом Оливера-Фарра [43].

Трибологические испытания проводили на установке УМТ-1 в условиях сухого трения по схеме «стержень-диск». В качестве контртела был использован шарик из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , радиусом 1,5 мм. Нагрузка во время испытаний

составляла 2 Н при скорости вращения подложки 1 об/с. Схема испытаний представлена на рисунке 7.

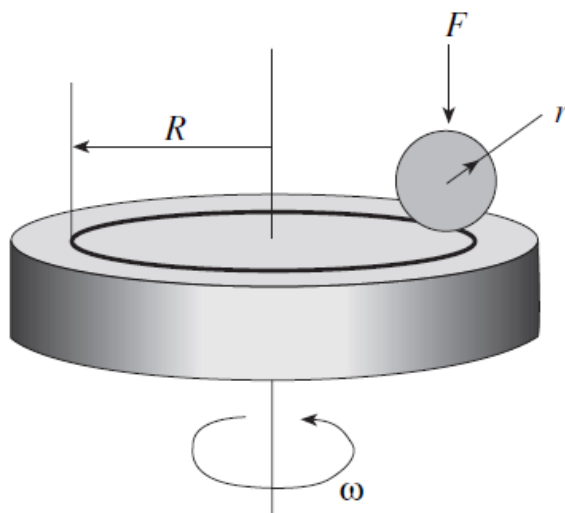


Рисунок 7 – Схема испытаний на УМТ-1:  $F$  – приложенная нагрузка,  $r$  – радиус шарика,  $R$  – радиус кольца износа

Профиль поперечного сечения бороздки износа получали путем измерений на лазерном интерференционном профилографе New View 600. Площадь поперечного сечения  $S$  вычислили путем усреднения 10 площадей поперечного сечения, полученных с помощью программы Origin 7.5. Потеря объема образца и скорость износа рассчитывались по формулам (1) и (2) соответственно.

$$\Delta V_{\text{обр}} = Sl \text{ (мм}^3\text{)}, \quad (1)$$

$$I = \frac{\Delta V}{NF}. \quad (2)$$

где  $l$  – длина дорожки износа (мм),  $S$  – площадь сечения дорожки износа (мм<sup>2</sup>),  $N$  – полная длина пробега контртела (м),  $F$  – приложенная нагрузка (Н).

## Глава 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

### 3.1 Изучение морфологии поверхности покрытий Ti-Al-N/Ti-Al методом атомно-силовой микроскопии

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что независимо от количества слоев в покрытии все исследованные образцы характеризуются мелкозернистым рельефом поверхности со средним латеральным размером зерен 100-200 нм (рисунок 8). Показано, что уменьшение толщины отдельного слоя при сохранении общей толщины покрытия способствует снижению шероховатости его поверхности. Наиболее высокой шероховатостью поверхности обладают однослойные покрытия Ti-Al-N (образец №1), а наименьшей шероховатостью характеризуются покрытия, состоящие из 21 слоя (образец №3).

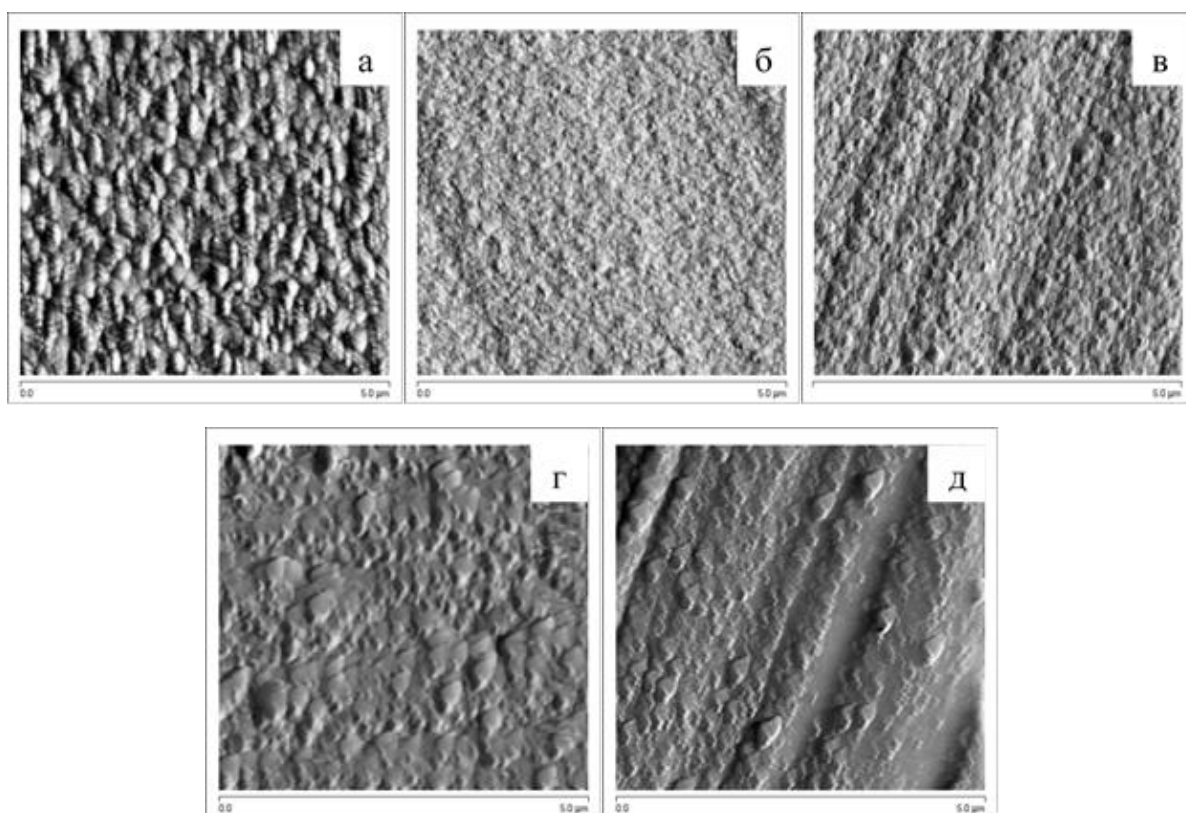




Рисунок 8 – АСМ-изображения поверхности покрытий на основе Ti-Al-N: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4, д – образец №5.

Номера образцов приведены согласно таблице 1

### 3.2 Исследование микроструктуры и фазового состава покрытий Ti-Al-N/Ti-Al

Морфология поперечного сечения однослойного покрытия Ti-Al-N и двух многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al показана на рисунке 9. Однослойное покрытие имеет столбчатую структуру, в то время как слои Ti-Al-N в многослойных покрытиях характеризуются плотной структурой без выраженных столбчатых зерен. Все многослойные покрытия характеризуются отсутствием трещин, дефектов и расслоений на границах раздела между слоями.

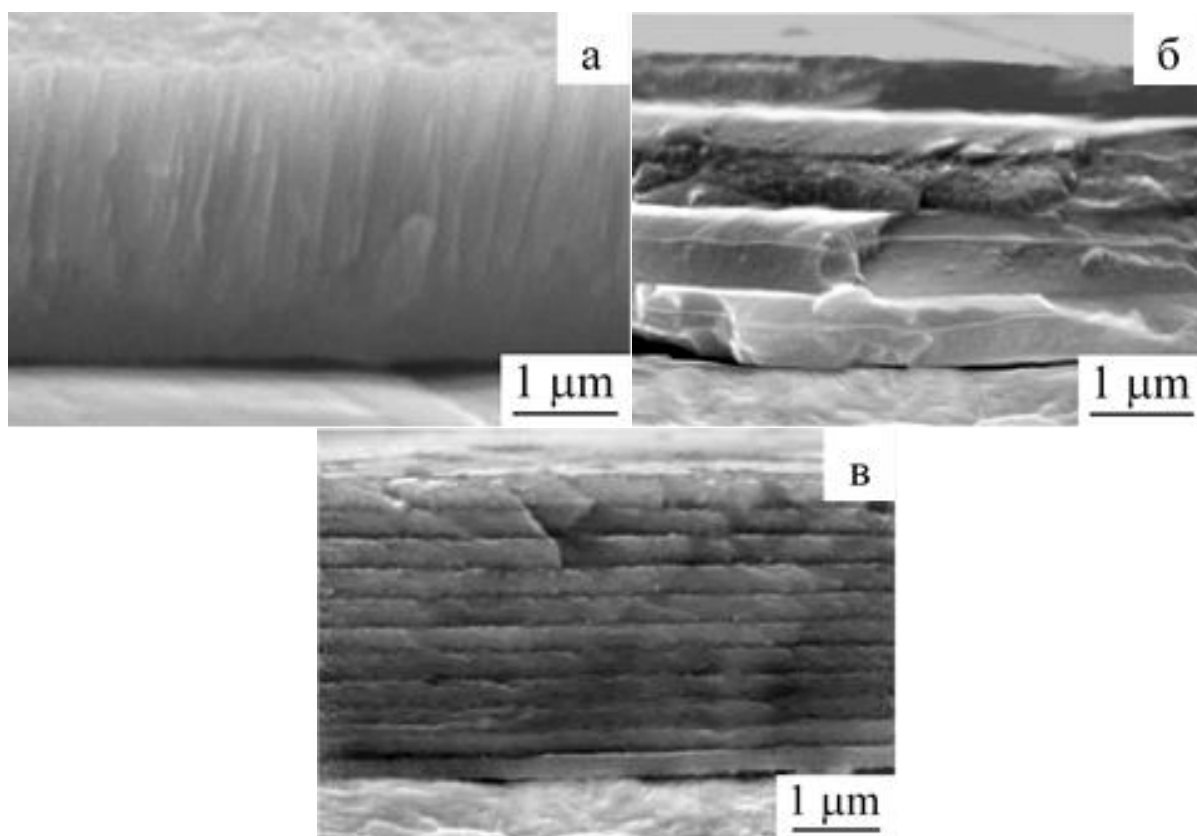


Рисунок 9 – СЭМ-изображения поперечных сечений покрытий на основе Ti-Al-N: а – образец №1, б - образец №2, в - образец №3. Номера приведены согласно таблице 1

Исследование поверхностного слоя покрытий методом рентгеновской дифракции показало, что состав керамических слоев во всех исследованных образцах представляет собой  $Ti_xAl_{1-x}N$  с  $x \approx 0,45$ . При этом по данным рентгеновской дифракции параметр решетки фазы  $Ti_xAl_{1-x}N$  составляет 0,416 нм. Это значение является промежуточным между параметрами решеток ГЦК фаз AlN (0,408 нм) и TiN (0,424 нм) и соответствует кристаллической решетке TiN, имеющего структуру типа NaCl B1, в которой Al частично замещает Ti. В многослойных покрытиях на дифрактограммах наряду с пиками  $Ti_xAl_{1-x}N$  также появляется рефлекс вблизи угла  $2\theta \approx 38,5^\circ$ , который соответствует  $\gamma$ -фазе алюминида титана TiAl с тетрагональной структурой  $L1_0$  (рисунок 10).

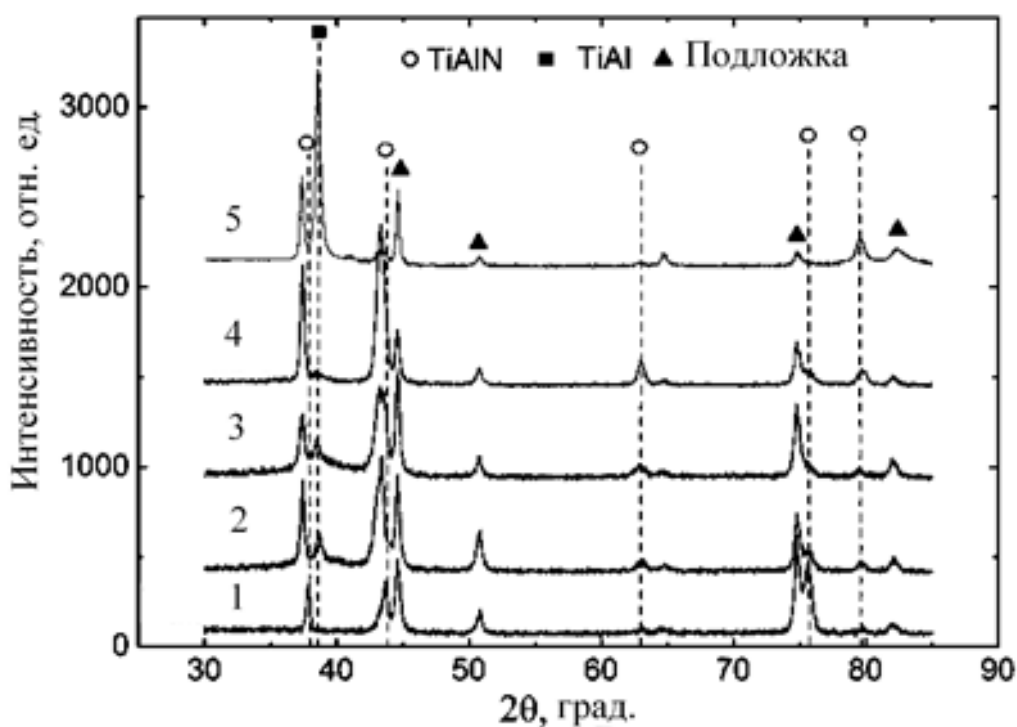


Рисунок 10 – Дифрактограммы покрытий на основе Ti-Al-N. Номера образцов приведены согласно таблице 1

### 3.3 Определение механических характеристик покрытий Ti-Al-N/Ti-Al

Измерение механических характеристик покрытий методом наноиндентирования показало, что нанесение промежуточных металлических слоев Ti-Al между керамическими слоями Ti-Al-N приводит к существенному снижению твердости  $H$  и эффективного модуля упругости покрытий  $E^*$  уже при глубине проникновения индентора в образец, не превышающей толщину верхнего керамического слоя (рисунок 11). При этом степень снижения механических характеристик покрытий зависит как от относительной, так и от абсолютной толщины керамических и металлических слоев. Так, уменьшение относительной толщины керамического слоя по сравнению с металлическим в 2 раза (образцы №4 и №2) при примерно одинаковой его абсолютной толщине вызывает падение твердости и модуля упругости покрытий на  $\sim 5$  ГПа и  $\sim 50$  ГПа, соответственно (рисунок 11). Еще более значительный эффект наблюдается при одновременном уменьшении относительной и абсолютной толщины керамического слоя (образцы №4 и №5). Причиной этого является увеличение вклада мягкого металлического слоя, находящегося под твердым керамическим слоем, с уменьшением толщины последнего, в механический отклик многослойной композиции. Необходимо отметить, что снижение механических характеристик покрытий наблюдается также при одновременном уменьшении толщины керамического и металлического слоев с 0,5 до 0,21 мкм (образцы №2 и №3), хотя известно, что, как правило, с уменьшением толщины прочность тонкопленочных структур возрастает. Можно полагать, что данный эффект объясняется двумя факторами. Во-первых, как было указано выше, уменьшение толщины керамического слоя приводит к увеличению вклада металлического слоя в измеряемые механические характеристики, особенно при малых приложенных нагрузках. Во-вторых, причиной этого могут быть структурно-фазовые изменения в покрытиях, содержащих 21 слой, (формирование текстуры в керамических слоях и интерметаллидных соединений в металлических слоях), а также снижение в них величины остаточных сжимающих напряжений.

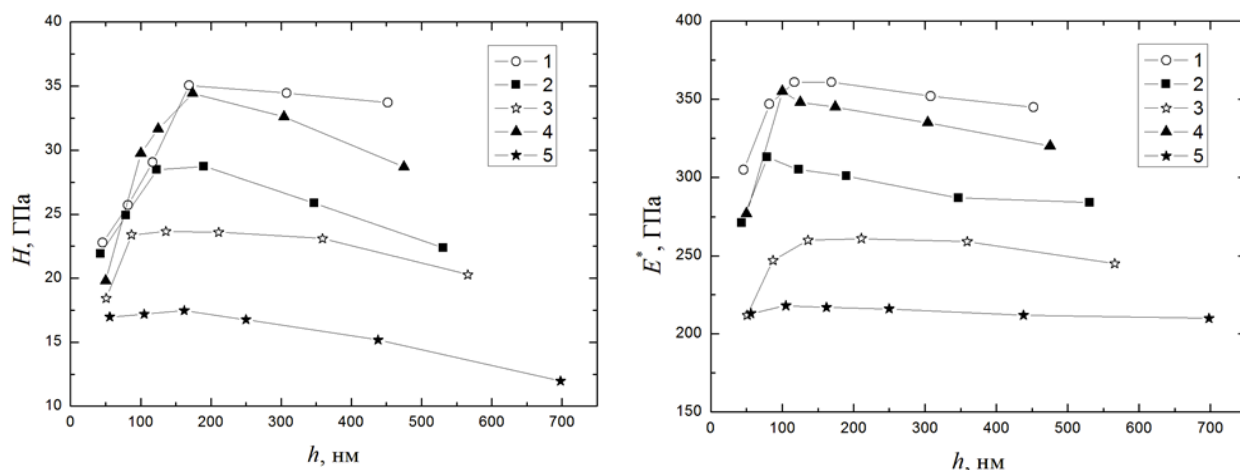


Рисунок 11 – Зависимости твердости (а) и приведенного модуля упругости (б) покрытий на основе Ti-Al-N от глубины проникновения индентора. Номера образцов приведены согласно таблице 1

### 3.4 Трибологические испытания покрытий Ti-Al-N/Ti-Al

Зависимость коэффициента трения исследованных покрытий от длительности трибологических испытаний показана на рисунке 12. Как видно из рисунка 12а-в, коэффициент трения образцов №2 и №3 немного выше его значения для однослойного образца №1. Это связано с тем, что во время испытаний верхний керамический и последующий металлический слои многослойных покрытий истираются с образованием частиц износа. В случае 7-слойного покрытия (образец №2) слой Ti-Al-N является достаточно толстым, что приводит к образованию лишь небольшого количества частиц износа. Следовательно, это покрытие демонстрирует незначительное увеличение коэффициента трения. Напротив, малая толщина верхнего слоя Ti-Al-N в 21-слойном покрытии (образец №3) обеспечивала его полное удаление по всей дорожке износа с последующим удалением металлического слоя, что в свою очередь привело к большому количеству частиц износа и к более выраженному увеличению  $\mu$ . Высокий коэффициент трения, наблюдаемый у образца №5 (рисунок 12д), характерен для нержавеющей стали и обусловлен полным удалением покрытия с дорожки износа. Наконец, образец №4 характеризуется

тем же значением  $\mu$ , что и однослойное покрытие (образец №1), поскольку имеет самый толстый верхний слой Ti-Al-N, который не был полностью изношен на этой стадии трибологических испытаний.

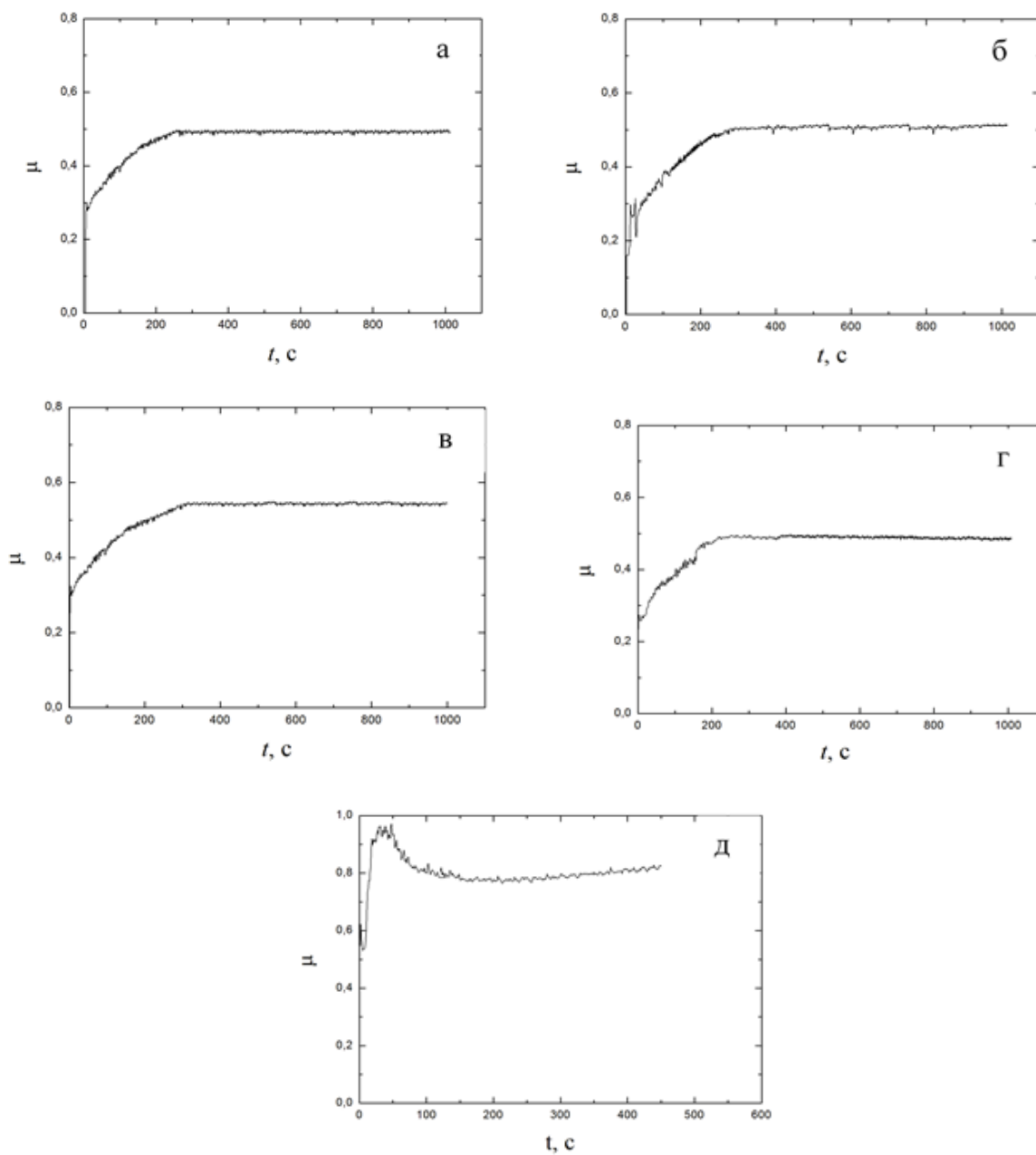


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента трения покрытий на основе Ti-Al-N от длительности испытаний на износ: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4, д – образец №5. Номера образцов приведены согласно таблице 1

Во время трибологических испытаний, абразивный износ являлся основным механизмом изнашивания большинства исследованных покрытий, за исключением образца №5, что обусловлено высокой твердостью контртела из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . В то же время, с помощью сканирующей электронной микроскопии (рисунок 13), проведенной после трибологических испытаний, были выявлены различные механизмы износа однослойного и многослойных покрытий.

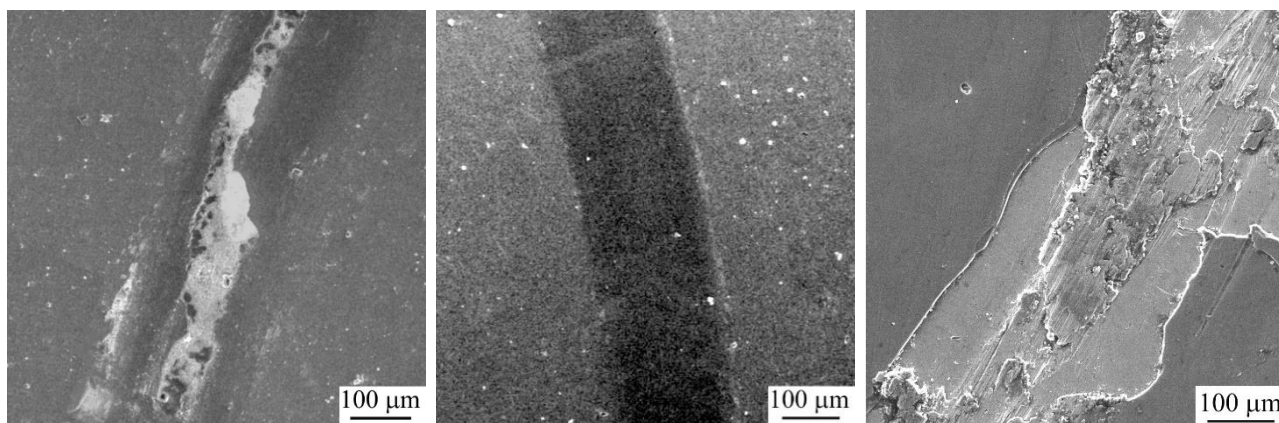


Рисунок 13 – СЭМ-изображения дорожек износа после трибологических испытаний: а – образец №1, б – образец №4, в – образец №5. Номера образцов приведены согласно таблице 1

Так, образец №1 имеет довольно гладкую дорожку износа, на которой, тем не менее, наблюдаются несколько больших сильно поврежденных участков, где покрытие было полностью удалено (рисунок 13а). Эти области расположены в середине дорожек износа, где наибольшее циклическое контактное напряжение вызывало распространение сквозных трещин через покрытие к подложке. За этим следовало отклонение трещины на границе раздела покрытие/подложка и отслоение фрагментов покрытия. Дорожки износа в образцах №№2-4 также являются гладкими, и, в отличие от однослойного покрытия, они не имеют серьезных повреждений (рисунок 13б). Наибольшие повреждения были обнаружены в многослойном покрытии с самыми толстыми слоями Ti-Al (образец №5). В этом случае покрытие было полностью удалено с дорожки износа. Кроме того, из рисунка 13в видно, что

большое количество частиц покрытия переносится вдоль дорожки износа и вновь прилипает к поверхности подложки. Эта схема изнашивания указывает на значительный вклад адгезионного механизма износа в образце №5.

На рисунке 14 приведены изображения и профили дорожек трения на поверхности покрытий на основе Ti-Al-N после трибологических испытаний. Из представленных профилограмм видно, что уже спустя 300 с испытаний покрытие Ti-Al-N/Ti-Al с толстыми металлическими слоями (образец №5) полностью изнашивается. Наименьшая глубина дорожки трения, наблюдается у многослойных покрытий с наибольшей общей толщиной керамических слоев (образец №4). У образцов №2 и №3 износ также, оказывается, меньше, чем у однослойного покрытия.

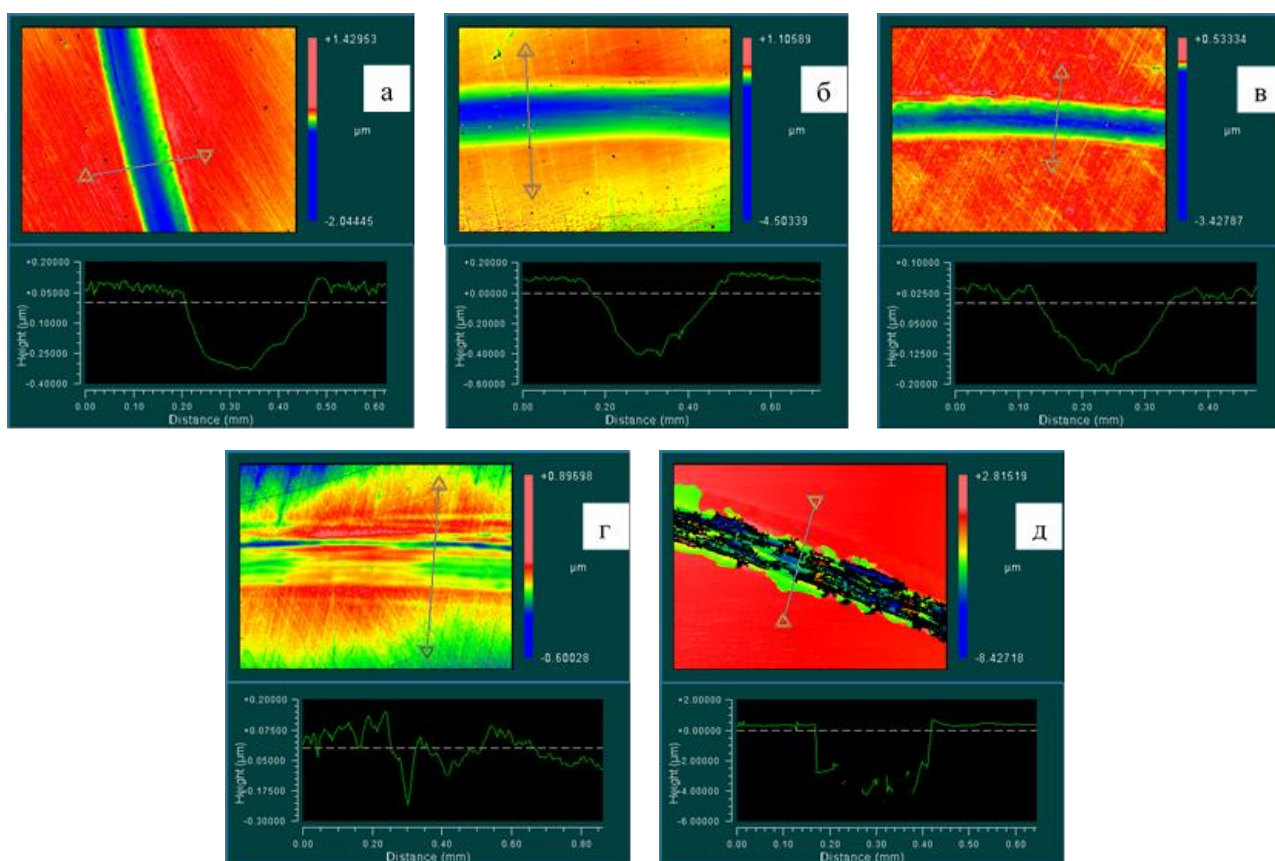


Рисунок 14 – Изображения и профили дорожек трения на поверхности покрытий на основе Ti-Al-N через 1000 (а-г) и 300 с (д) трибологических испытаний: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4, д – образец №5. Номера образцов приведены согласно таблице 1

На рисунке 15 представлены скорости износа покрытий Ti-Al-N/Ti-Al после трибологических испытаний. Видно, что в соответствии с данными СЭМ скорость износа многослойного покрытия с самыми толстыми слоями Ti-Al (образец №5) более чем в три раза выше, чем у однослойного покрытия. Тем не менее, другие многослойные покрытия демонстрируют снижение скорости износа по сравнению с образцом №1. Покрытие с наиболее толстыми керамическими слоями (образец №4) характеризуется самой низкой скоростью износа, которая примерно в три раза ниже, чем у однослойного образца №1.

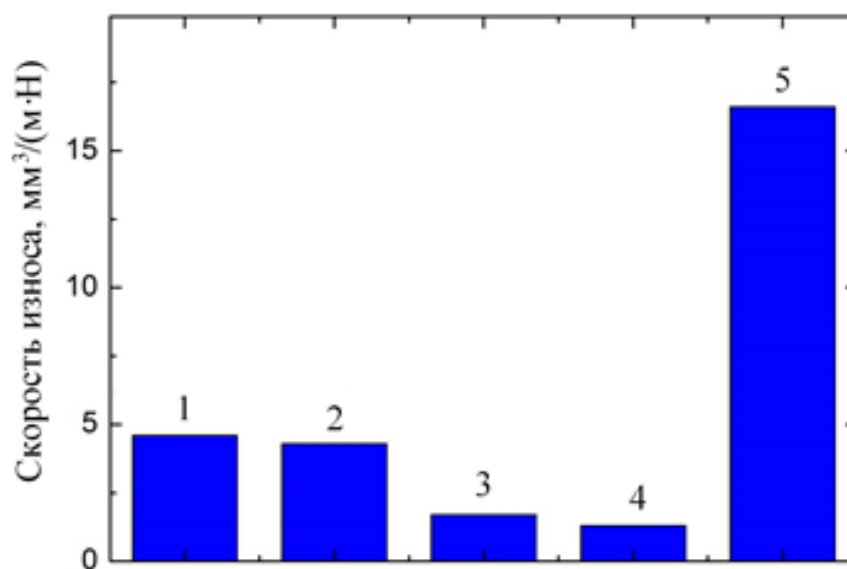


Рисунок 15. Приведенный износ покрытий Ti-Al-N/Ti-Al: а - образец №1, б - образец №2, в - образец №3, г - образец №4, д - образец №5. Номера образцов приведены согласно таблице 1



## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Организация и планирование работ**

Группа, выполнявшая исследование, состояла из научного руководителя и студента. По каждому виду работ устанавливалась соответствующая должность исполнителя. Порядок этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ, а также загрузка исполнителей приведены в таблице 2.

Таблица 2. Календарный план исследования

<b>Этапы работы</b>	<b>Исполнители</b>	<b>Загрузка исполнителей</b>
Постановка целей и задач	НР	НР – 100%
Составление и утверждение технического задания	НР., И	НР – 100% И – 10%
Изучение литературы	НР., И	НР – 100% И – 100%
Подготовка подложек	И	И – 100%
Подбор режимов нанесения покрытий	НР, И	НР – 50% И – 100%
Получение покрытий	НР, И	НР – 50% И – 100%
Исследование физико- механических и трибологических свойств покрытий	НР., И	НР – 100% И – 100%
Обработка полученных результатов	НР, И	НР – 100% И – 80%
Подготовка отчета	НР., И	НР – 60% И – 100%

## 4.2 Продолжительность этапов работ

Для расчета вероятных продолжительностей этапов работ использовался опытно-статистический экспертный метод. Ожидаемые продолжительности вычислялись по следующей формуле (3):

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 * t_{\text{min}} + 2 * t_{\text{max}}}{5}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{min}}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;  $t_{\text{max}}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

Для построения линейного графика, длительность этапов рассчитывалась в рабочих и календарных по формулам (4) и (5) соответственно.

$$T_{\text{РД}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{ВН}}} * K_{\text{Д}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{ож}}$  – продолжительность работы, дн.;  $K_{\text{ВН}}$  – коэффициент выполнения работ;  $K_{\text{Д}}$  – коэффициент учета дополнительного времени на непредвиденные задержки.

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} * T_{\text{К}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{К}}$  – коэффициент календарности, рассчитываемый по формуле (6) [44]:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} 1,205, \quad (6)$$

где  $T_{\text{КАЛ}}$  – календарные дни;  $T_{\text{ВД}}$  – выходные дни;  $T_{\text{ПД}}$  – праздничные дни.

В таблице 3 приведены минимальные, максимальные и ожидаемые продолжительности этапов работ для каждого исполнителя, а также длительности этапов в календарных и рабочих днях. Затем, с помощью

значений  $T_{\text{КД}}$ , был построен линейный график проведения исследования (таблица 4).

Таблица 3. Таблица трудозатрат при проведении исследования

№ этапа	Этапы работы	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
						$T_{\text{РД}}$		$T_{\text{КД}}$	
			$t_{\text{min}}$	$t_{\text{max}}$	$t_{\text{ож}}$	НР	И	НР	И
1	Постановка целей и задач	НР	1	3	1,8	1,8	-	2,2	-
2	Составление и утверждение технического задания	НР., И	1	3	1,8	1,8	0,18	2,2	0,22
3	Изучение литературы	НР., И	5	8	6,2	6,2	6,2	7,5	7,5
4	Подготовка подложек	И	20	25	22	-	22	-	26,5
5	Подбор режимов нанесения покрытий	НР, И	11	13	11,8	5,9	11,8	7,1	14,2
6	Получение покрытий	НР, И	11	13	11,8	5,9	11,8	7,1	14,2
7	Исследование физико- механических и трибологических свойств покрытий	НР., И	10	12	10,8	10,8	10,8	13	13
8	Обработка полученных результатов	НР, И	18	20	18,8	18,8	15	22,7	18,1
9	Подготовка отчета	НР., И	12	18	14,4	8,6	14,4	10,4	17,4
Итого:					95,4	59,8	92,2	72,2	111,1

Таблица 4. Линейный график этапов работ

Этап	НР	И	Февраль			Март			Апрель			Май		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	2,2	-	■											
2	2,2	0,22	■											
3	7,5	7,5	■	■										
4	-	26,5		■	■	■								
5	7,1	14,2				■	■							
6	7,1	14,2						■	■					
7	18,1	18,1							■	■				
8	33,9	27,2								■	■	■		
9	10,4	17,4											■	■

НР ■; И - ■

#### 4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

##### 4.3.1 Расчёт затрат на материалы

В данной статье расходов была учтена стоимость материалов и изделий, приобретенных для проведения исследования (таблица 5), а также учтены транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), оцененные как 5% от отпускной цены закупленных материалов.

Таблица 5. Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Сталь 12X18Н10Т	2795	0,03 м <sup>3</sup>	84
Баллон Ar	680	1 шт	680
Баллон N	470	1 шт	470
Мишень 0,45Ti-0,55Al	23000	1 шт	23000
Итого			24234

В виду того, что ТЗР составляют 5% от итоговой цены материалов, расходы, учитывающие ТЗР, равны  $C_{\text{мат}}=1,05*24234=25445,7$

#### 4.3.2 Расчет заработной платы

В данной статье расходов учтена заработная плата научного руководителя и исполнителя проекта, а также премии. Расчет основной заработной платы выполнялся на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада (МО) исполнителя (таблица 6). Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле (7):

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}, \quad (7)$$

где 25,083 среднее число рабочих дней в месяце приходящихся на 301 рабочий день при шестидневной рабочей неделе [45].

Полный фонд зарплаты вычисляется как произведение среднедневной ставки, количества затраченных рабочих дней и интегрального коэффициента, равного 1,699 для шестидневной рабочей недели.

Таблица 6. Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	61235,20	2441,3	60	1,699	248866
И	15470	616,8	92	1,62	91928
Итого:					340794

### 4.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Единый социальный налог (ЕСН), который включает в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.  $C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} * 0,3 = 102238,2$  руб.

### 4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

В данном разделе рассчитываются затраты на электроэнергию (8), потраченную в процессе отработки режимов нанесения и непосредственном синтезе пленок на установке МРС-1М, а также при работе персонального компьютера (таблица 7).

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} * t_{\text{об}} * C_{\text{э}} \quad (8)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час;  $C_{\text{э}} = 5,748$  руб./кВт·час – тариф на 1 кВт·час.

Время работы оборудования было получено путем прямого учета. Мощность, потребляемая оборудованием найдена из официальной приложенной документации.

Таблица 7. Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$ , кВт	$C_{\text{эл.об}}$ , руб.
Установка МИР-1М	27	2,5	387,99
Персональный компьютер	120	0,3	206,93
Итого:			594,9

#### 4.3.5 Расчет амортизационных расходов

Амортизация используемого за время выполнения исследования оборудования (таблица 8), рассчитывалась по формуле (9):

$$C_{AM} = \frac{H_A * C_{об} * t_{рф}}{F_D} \quad (9)$$

где  $H_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;  $C_{об}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;  $F_D$  – действительный годовой фонд времени работы оборудования;  $t_{рф}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта.

Таблица 8. Амортизационные расходы.

Наименование оборудования	$H_A$	$C_{об}$ , руб.	$t_{рф}$ , час	$F_D$ , час	$C_{AM}$ , руб
Персональный компьютер	0,4	30000	120	2024	711,46
Установка МИР-1М	0,1	1400000	27	2024	1867,58
Итого:					2579,04

#### 4.3.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов

В данной статье расходов учтены траты на исследования, проведенные сторонними лицами. Итоговая сумма составила  $C_{НР} = 27500$  руб.

#### 4.3.7 Расчет прочих расходов

В этой статье отражены расходы на выполнение исследования, которые не были учтены в предыдущих статьях, и принимаются как 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат.}} + C_{\text{зп.}} + C_{\text{соц.}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам.}} + C_{\text{нп}}) * 0,1 =$$

$$= (340794 + 102238,2 + 2579,04 + 594,9 + 24234 + 27500) * 0,1 =$$

$$= 49794 \text{ руб.}$$

#### 4.3.8 Расчет общей стоимости разработки

Общая стоимость исследования рассчитывалась как сумма всех затрат на проект (таблица 9) [46].

Таблица 9. Затраты на исследование

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат.}}$	24234
Основная заработная плата	$C_{\text{зп.}}$	340794
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц.}}$	102238
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.об.}}$	594,9
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам.}}$	2579,04
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нп}}$	27500
Прочие расходы	$C_{\text{проч.}}$	49794
Итого:		547733,94

Таким образом, затраты на исследование составили 547733,94 рублей.



#### **4.3.9 Расчет прибыли**

Прибыль от внедрения исследуемых защитных покрытий в производство принимается в размере 20% от полной себестоимости проекта: 109546,8 руб.

#### **4.3.10 Расчет НДС**

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. Относительно данных покрытий:  $(547733,94 + 109546,8) * 0,2 = 131456,1$  руб.

#### **4.3.11 Цена разработки НИР**

Цена разработки НИР равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:  $131456,1 + 109546,8 + 547733,94 = 788736,9$  руб.

#### **4.4 Оценка экономической эффективности исследования**

Оценка экономической эффективности данного исследования не возможна.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

Важной и в то же время актуальной задачей современной промышленности, является разработка защитных средств для деталей и механизмов. Одним из таких средств, являются защитные покрытия, и, в частности, многослойные композиции Ti-Al-N/Ti-Al. Несмотря на высокие физико-механические характеристики, они могут иметь низкую износостойкость, причиной чего служит их неоптимальная архитектура.

В данной работе исследуются механические и трибологические свойства покрытий Ti-Al-N/Ti-Al с различным количеством и толщиной слоев. Покрытия были получены методом реактивного магнетронного распыления на установке МИР-1М в кабинете №102, 3 корпуса ИФПМ СО РАН.

Целью данного раздела является анализ вредных и опасных производственных факторов, а также разработка комплекса защитных мероприятий.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

К работе на установке МИР-1М допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте [47]. К самостоятельной работе допускаются работники после получения II группы электробезопасности и допуска к работе с газовыми баллонами, работающими под давлением.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, а также правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

В этом разделе рассмотрены различные аспекты вопросов, тесно связанных с созданием рабочего места в полном соответствии с существующими нормами техники производственной безопасности, нормами санитарии и требованиями по охране окружающей среды [48, 49, 50, 51].

Помещение, в котором располагается установка, имеет линейные размеры 6×5 м и высоту 3 м. В помещение есть два окна размерами 1,8×1,5 м, которые обеспечивают достаточное проникновение солнечного света, с противоположной стороны окон находится дверной проем.

Нанесение покрытий Ti-Al-N/Ti-Al производилось при помощи установки реактивного магнетронного распыления МИР-1М. Установка оснащена форвакуумным и диффузионным насосами. Для очистки подложки применяется ионная очистка её поверхности с помощью ионного источника. В качестве рабочего газа используется газ аргон, а реактивного – азот.

## 5.2 Профессиональная социальная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [52]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	-			Требования к микроклимату устанавливаются согласно СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [53].
2. Превышение уровня шума				Требования к уровню шума на рабочих местах устанавливаются согласно [54]. ГОСТ 12.1.003-8. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума [55].
3.Отсутствие или недостаток естественного света	-			-
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны				Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[56].
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-			Система стандартов по электромагнитной безопасности складывается из ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. [57] и СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [58].

### 5.2.1 Анализ вредных производственных факторов

При работе на установке МИР-1М возможно воздействие вредных и опасных факторов, негативно влияющих на здоровье сотрудников. К первой группе факторов можно отнести микроклимат помещения, шум, освещение рабочей зоны, а также электромагнитное поле. В качестве второй группы факторов необходимо рассмотреть возможность поражения электрическим током, взаимодействие с химическими веществами и работа с баллонами.

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 11 [53].

Таблица 11 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20 - 25 °С, зимой – 13 - 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Источник шумового загрязнения – вращающиеся части механических насосов. При работе механического насоса максимальность шумового загрязнения составляет 52 дБ на расстоянии 1 м. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метров от установки. Предельно допустимый уровень шумов и средства защиты должны удовлетворять [54, 55]. Работающих в этих зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

Уровень освещенности, на рабочем месте, должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости. Световой спектр должен максимально соответствовать дневному освещению, так как оно оптимально

соответствует человеческой физиологии. Очень высокий уровень освещенности, так же, как и недостаточный, приводит к быстрому утомлению зрения. Освещение должно быть равномерным на всей площади рабочего места, так как при переносе взгляда с более освещенных на менее освещенные участки рабочего места и наоборот происходит понижение остроты зрения на достаточно долгий промежуток времени. Требования к уровню освещенности в производственных помещениях утверждены сводом правил [56].

Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается. Учитывая особенности процесса работы на установке МИР-1М (не требуется освещения для проведения работ высокой точности) возможно применение схемы общего равномерного освещения.

Электромагнитное поле – это силовое поле, образованное вокруг электрического тока, эквивалентное электрическому полю и магнитному полю, расположенным под прямыми углами друг к другу [59].

Источниками электромагнитного излучения являются приборы, работающие от электрического тока. Например: линии электропередач компьютеры, телефоны, и т.д. Помещение, в котором располагается научно-исследовательское оборудование, оснащено персональными компьютерами, которые являются основным источником электромагнитного излучения. В России система стандартов по электромагнитной безопасности складывается из ГОСТ [57] и СанПиН [58]. Длительное воздействие электромагнитного излучения на организм человека ведёт к нарушениям процессов в ЦНС, сбоям в работе сердечно-сосудистой системы. Первыми симптомами воздействия

электромагнитных полей являются быстрая утомляемость, слабость, головные боли, понижение частоты пульса и повышение температуры тела.

### **5.2.2 Анализ опасных факторов**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Опасность электропоражения существует в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках.

Проходя через организм человека, электроток производит термическое, электролитическое, механическое, биологическое, световое воздействие.

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока. Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасные помещения).



Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов – в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности [60, 61].

Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением до 1000 В являются изолирующие штанги, указатели напряжения, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ. К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

При работе на установке в качестве рабочего газа используется аргон. Газообразный аргон не оказывает опасного воздействия на окружающую среду. Он тяжелее воздуха и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола. При этом снижается содержание кислорода в воздухе, что вызывает кислородную недостаточность и удушье. Однако, ПДК на данный газ не предусмотрен. Аргон по опасности относится к классу 2. Также необходимо проводить проверку баллонов на наличие неисправностей так как при утечке газа из баллона возможно удушье, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами. Проверить целостность газового баллона и прочность его крепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне.

### **5.3 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды – комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Для подобного перехода необходимо улучшить систему фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов, так как масло и масляные пары непосредственно влияют на окружающую среду в целом. Следовательно, данный вопрос необходим к рассмотрению.

Воздействие масляных продуктов на почву сопровождается:

- отторжением пахотных земель или уменьшением их плодородия;
- чрезмерным насыщением токсичными веществами растений, что неизбежно приводит к загрязнению продуктов питания растительного и животного происхождения;
- загрязнением грунтовых вод, особенно в зоне свалок.

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика, резины и т. д. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований**

При возникновении неисправностей в работе на установке МИР-1М необходимо выполнить следующие действия:

- закрыть вентиль подачи аргона;
- отключить диффузионный и пластинчато-роторный насосы;

- отключить питание;
- закрыть клапан подачи воды
- известить об этом вышестоящего руководителя.

В случае обнаружения утечки газа из баллона немедленно прекратить подачу газа из баллона и сообщить об аварийной ситуации непосредственному руководителю.

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, закрыть баллон с газом, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь, до приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

#### **5.4.2 Разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Самым распространенным видом ЧС является пожар. Под пожаром понимают неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государству.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- 1) использование только исправного оборудования;

2) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;

3) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;

4) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии (рисунок 16).

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

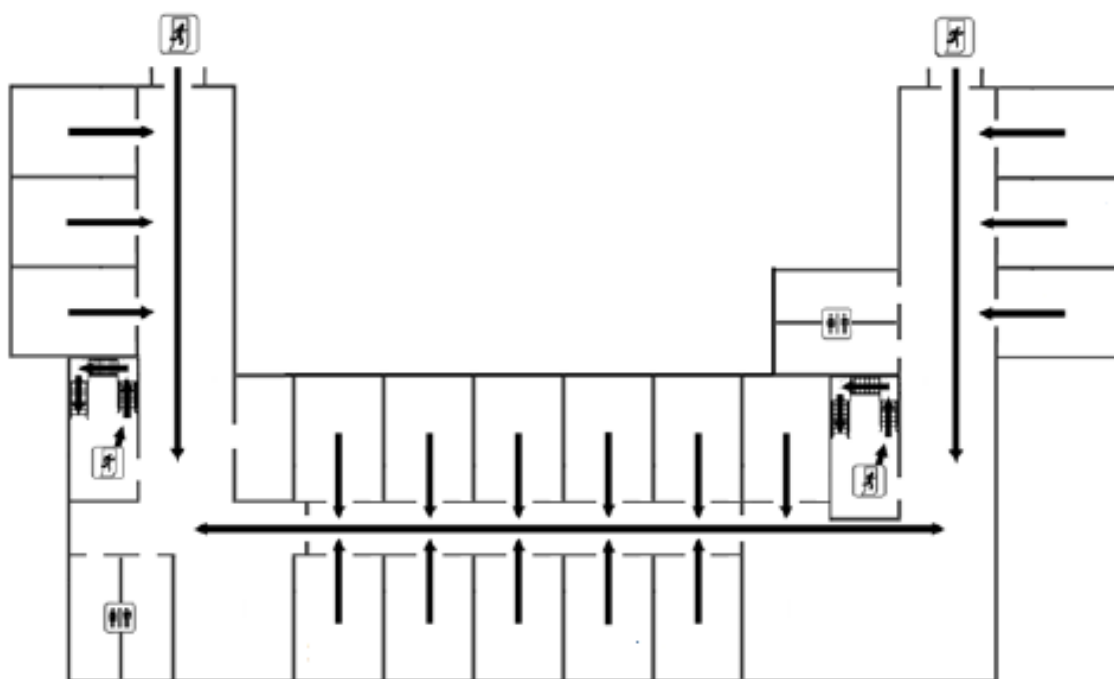


Рисунок 16 – План эвакуации при пожаре и других ЧС

## 5.5 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены необходимые правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, в которых регламентируются условия труда, необходимые инструкции по работе со специальным оборудованием, а также гигиенические требования к организации работы.

Были выявлены и проанализированы опасные и вредные факторы производственной среды. К вредным факторам можно отнести: воздействие электрического напряжения на организм человека, микроклимат, воздействие шума и высоких электромагнитных полей. К опасным факторам можно отнести: электробезопасность, термическую опасность и пожаровзрывоопасность.

К факторам рабочего места, влияющим на окружающую среду, относятся масляные пары. Для предотвращения негативного влияния эксплуатации установки могут использоваться масляные фильтры.

Также были рассмотрены различные чрезвычайные ситуации при работе на вакуумной установке и правильный порядок действий при их возникновении.

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что многослойные покрытия, содержащие чередующиеся керамические (Ti-Al-N) и металлические слои (Ti-Al), при оптимальном сочетании толщин данных слоев характеризуются существенно более высокой износостойкостью, чем однослойные покрытия Ti-Al-N аналогичной толщины. Этот эффект связан с наличием в многослойных покрытиях металлических слоев, обладающих высокой трещиностойкостью, и границ раздела между слоями, которые способствуют отклонению возникающих на поверхности трещин. Оба этих фактора обеспечивают эффективную диссипацию энергии и способствуют замедлению распространения трещин в глубь покрытий, подавляя их хрупкое разрушение.

Показано, что количество слоев в исследованных многослойных покрытиях Ti-Al-N/Ti-Al не оказывает существенного влияния на их износостойкость при условии сохранения общей толщины покрытия и суммарной толщины металлических (или керамических) слоев. Это связано с тем, что положительный эффект от повышения трещиностойкости покрытий с ростом в них числа внутренних границ раздела нейтрализуется увеличением их податливости вследствие снижения изгибной жесткости тонких керамических слоев по сравнению с более толстыми. Последнее обуславливает рост кривизны изгиба покрытия, что способствует его растрескиванию и скалыванию.

В то же время продемонстрировано, что значительную роль в повышении износостойкости многослойных покрытий Ti-Al-N/Ti-Al играет толщина металлических и керамических слоев. Сформулированные на основе полученных результатов принципы конструирования многослойных покрытий предполагают, что для достижения их высокой износостойкости металлические слои, с одной стороны, должны быть достаточно толстыми, чтобы обеспечить высокую трещиностойкость покрытия, а с другой – достаточно тонкими по

сравнению с керамическими слоями, чтобы не вызывать существенного снижения его твердости. В свою очередь, керамические слои также, с одной стороны, должны быть достаточно толстыми, чтобы обеспечить высокие твердость и изгибную жесткость покрытия, а с другой – достаточно тонкими, чтобы не вызывать его хрупкое разрушение. Оптимальное соотношение толщин металлических и керамических слоев определяется соотношением их физико-механических характеристик.

## Список литературы

1. Knotek O., Löffler F., Krämer G. Multicomponent and multilayer physically vapour deposited coatings for cutting tools //Surface and Coatings Technology. – 1992. – Т. 54. – С. 241-248.
2. Subramanian C., Strafford K. N. Review of multicomponent and multilayer coatings for tribological applications //Wear. – 1993. – Т. 165. – №. 1. – С. 85-95.
3. Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Т. 207. – С. 50-65.
4. Veprek S. Recent search for new superhard materials: Go nano! //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2013. – Т. 31. – №. 5. – С. 050822.
5. Mayrhofer P.H., Rachbauer R., Holec D., Rovere F., Schneider J.M. Protective Transition Metal Nitride Coatings // Comprehensive Materials Processing. Elsevier, 2014. С. 355-388.
6. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review //Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Т. 342. – №. 1-2. – С. 58-79.
7. Holleck H. Basic principles of specific applications of ceramic materials as protective layers //Surface and coatings Technology. – 1990. – Т. 43. – С. 245-258.
8. Holleck H. Material selection for hard coatings //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1986. – Т. 4. – №. 6. – С. 2661-2669.
9. Wiederhorn S. M. Brittle fracture and toughening mechanisms in ceramics //Annual Review of Materials Science. – 1984. – Т. 14. – №. 1. – С. 373-403.
10. Musil J. et al. Thermal stability of alumina thin films containing  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase prepared by reactive magnetron sputtering //Applied surface science. – 2010. – Т. 257. – №. 3. – С. 1058-1062.



11. Wasa K., Kanno I., Kotera H. Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nanomaterials, and MEMS. - 2 изд. William Andrew, 2012. - 660 с.
12. Du Hong, Yaran Niu, Hong Li, Xin Zhong, Wenhua Tu, Xuebin Zheng, Jinliang Sun Comparison of microstructure and tribological properties of plasma-sprayed TiN, TiC and TiB<sub>2</sub> coatings // Surface and Coatings Technology. 2019. №366.
13. Wan S. et al. Tribological performance of CrN and CrN/GLC coated components for automotive engine applications //Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Т. 695. – С. 433-442.
14. Balashabadi P. et al. The role of Cu content on the structural properties and hardness of TiN–Cu nanocomposite film //Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Т. 728. – С. 863-871.
15. Qingchun Chen, Guizhi Wu, Dongshan Li, An Li, Lunlin Shang, Zhibin Lu, Guangan Zhang, Zhiguo Wu, Guangke Tian Understanding the unusual friction behavior of TiN films in vacuum // Tribology International. - 2019. - №137. - С. 379-386.
16. Stueber M. et al. Concepts for the design of advanced nanoscale PVD multilayer protective thin films //Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Т. 483. – №. 1-2. – С. 321-333.
17. Kalss W. et al. Modern coatings in high performance cutting applications //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2006. – Т. 24. – №. 5. – С. 399-404.
18. Liu Z. J., Shum P. W., Shen Y. G. Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti–Al–N solid solution films //Thin Solid Films. – 2004. – Т. 468. – №. 1-2. – С. 161-166.
19. Zhou M. et al. Phase transition and properties of Ti–Al–N thin films prepared by rf-plasma assisted magnetron sputtering //Thin solid films. – 1999. – Т. 339. – №. 1-2. – С. 203-208.

20. Zhang S. et al. Ni-toughened nc-TiN/a-SiN<sub>x</sub> nanocomposite thin films //Surface and Coatings Technology. – 2005. – T. 200. – №. 5-6. – C. 1530-1534.
21. Wang C. et al. Toughness enhancement of nanostructured hard coatings: Design strategies and toughness measurement techniques //Surface and Coatings Technology. – 2014. – T. 257. – C. 206-212.
22. Zhang S. et al. Toughening of hard nanostructural thin films: a critical review //Surface and Coatings Technology. – 2005. – T. 198. – №. 1-3. – C. 2-8.
23. Vieira M. T., Ramos A. S. The influence of ductile interlayers on the mechanical performance of tungsten nitride coatings //Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – T. 92. – C. 156-161.
24. Tillmann W., Vogli E., Momeni S. Mechanical and tribological properties of Ti/TiAlN duplex coatings on high and low alloy tool steels //Vacuum. – 2009. – T. 84. – №. 3. – C. 387-392.
25. Vogli E. et al. Influence of Ti/TiAlN-multilayer designs on their residual stresses and mechanical properties //Applied Surface Science. – 2011. – T. 257. – №. 20. – C. 8550-8557.
26. Castanho J. M., Vieira M. T. Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings //Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – T. 143. – C. 352-357.
27. Leu M. S. et al. Microstructure and physical properties of arc ion plated TiAlN/Cu thin film //Surface and Coatings Technology. – 2006. – T. 201. – №. 7. – C. 3982-3986.
28. Shang H., Li J., Shao T. Mechanical properties and thermal stability of TiAlN/Ta multilayer film deposited by ion beam assisted deposition //Applied Surface Science. – 2014. – T. 310. – C. 317-320.
29. Tavares C. J. et al. A structural and mechanical analysis on PVD-grown (Ti, Al) N/Mo multilayers //Thin Solid Films. – 2000. – T. 377. – C. 425-429.
30. Pac M. J. et al. Investigation of Ti<sub>0.54</sub>Al<sub>0.46</sub>/Ti<sub>0.54</sub>Al<sub>0.46</sub>N multilayer films deposited by reactive gas pulsing process by nano-indentation and electron energy-loss spectroscopy //Thin Solid Films. – 2017. – T. 634. – C. 96-106.

31. Canto C. E. et al. Adhesive and tribocorrosive behavior of TiAlPtN/TiAlN/TiAl multilayers sputtered coatings over CoCrMo //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – T. 406. – C. 32-37.
32. Colombo D. A. et al. Mechanical and tribological behavior of Ti/TiN and TiAl/TiAlN coated austempered ductile iron //Thin Solid Films. – 2018. – T. 647. – C. 19-25.
33. Polcar T., Cavaleiro A. High temperature behavior of nanolayered CrAlTiN coating: thermal stability, oxidation, and tribological properties //Surface and Coatings Technology. – 2014. – T. 257. – C. 70-77.
34. Ali R., Sebastiani M., Bemporad E. Influence of Ti–TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion //Materials & Design. – 2015. – T. 75. – C. 47-56.
35. Shugurov A. R. et al. Effect of the number of layers in Zr-YO/Si-Al-N multilayer coatings on their mechanical properties and wear resistance //Journal of Friction and Wear. – 2014. – T. 35. – №. 5. – C. 426-433.
36. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection //Surface and Coatings Technology. – 1995. – T. 76. – C. 328-336.
37. Holleck H., Kühl Ch., Schulz H. Summary Abstract: Wear resistant carbide–boride composite coatings // Journal of Vacuum Science & Technology A. - 1985. - №6. - C. 2345-2347.
38. Donald M. Mattox The Foundations of Vacuum Coating Technology. - 2 изд. - Albuquerque: William Andrew, 2018. - 378 с.
39. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. - 2 изд. - Albuquerque: William Andrew, 1996. - 773 с.
40. Shishkovsky I. V., Lebedev P. N. Chemical and physical vapor deposition methods for nanocoatings //Nanocoatings and Ultra-Thin Films. – Woodhead Publishing, 2011. – C. 57-77.

41. Lin K. L., Hwang M. Y., Wu C. D. The deposition and wear properties of cathodic arc plasma deposition TiAlN deposits //Materials chemistry and physics. – 1996. – Т. 46. – №. 1. – С. 77-83.
42. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. //Киев: Аверс, 2008. - 246 с.
43. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments //Journal of materials research. – 1992. – Т. 7. – №. 6. – С. 1564-1583.
44. Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.
45. Бочаров В. В. Инвестиции : учебник для вузов / В. В. Бочаров. – 2-е изд. – СПб: Питер, 2009. – 381 с. – Учебник для вузов.
46. Несветаев Ю. А. Экономическая оценка инвестиций: учебное пособие / Ю. А. Несветаев; Московский Государственный индустриальный университет; Институт дистанционного образования. – 3-е изд., стер. – Москва: Изд-во МГИУ, 2006. – 162 с.
47. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).
48. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
49. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
50. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
51. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

52. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

53. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

54. ГОСТ 12.1.003-8. Шум. Общие требования безопасности.

55. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума.

56. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*

57. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

58. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

59. Белов С. В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) //М.: Юрайт. – 2011. – С. 680.

60. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.

61. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.